

甘肃阳山超大型金矿成因研究评述

赵成海^{1, 2}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘 要: 阳山金矿床位于西秦岭勉略缝合带内, 是我国近期发现的世界级超大型金矿床。本文根据前人稳定同位素和流体包裹体地球化学以及年代学研究, 结合矿区构造地质背景和矿物组合, 讨论其成因机制。研究表明, 阳山金矿床的形成时间与勉略缝合带碰撞期(晚三叠世 - 早侏罗世)的构造-岩浆事件接近。碰撞造山作用是大规模花岗岩浆活动的主要诱因。大量变质流体在岩浆热驱动下, 沿花岗岩与破碎千枚岩的接触带上涌, 萃取地层中已相对富集的金, 并以络合物的形式搬运成矿。阳山超大型金矿床兼有卡林型金矿和造山型金矿的特征, 又有与两者明显区别的地质和地球化学特征, 在西秦岭地区的金矿床中具有重要的代表性。

关 键 词: 超大型金矿床; 成因; 流体作用; 甘肃阳山

中图分类号: P618.510.142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2009)03-0286-08

Discussion of the Genesis of Super-Large Gold Deposit in Yangshan, Gansu

ZHAO Cheng-hai^{1, 2}

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Yangshan gold deposit, a worldwide super-large gold deposit discovered recently in China, locates in Mianlue suture of the west Qinling. Based on the previous geochemical studies of stable isotopes and fluid inclusions, and combined with information of the tectonic background and the mineral combination types, this article discussed the cause of formation of Yangshan gold deposit. The formation time of Yangshan gold deposit is close to the tectonic-magma event, which happened during collision of Mianlue suture (late Trias to early Jurassic). A large-scale granitic magma event was generated by the collision and orogeny processes, abundant of magma hydrotherm driven by magma heat streamed up along the aureole of granitic porphyry and fractural phyllite, and extracted the relatively gold-enriched stratum, and then gold was carried around as complex to form gold deposit. Yangshan gold deposit has some characteristics similar to both the Carlin-type and the orogeny-type gold deposits, and is still significantly different from their geological and geochemical features. Yangshan gold deposit is an important typical gold deposit in the west Qinling China.

Key words: super-large gold deposit; genesis; fluid processes; Yangshan in Gansu Province

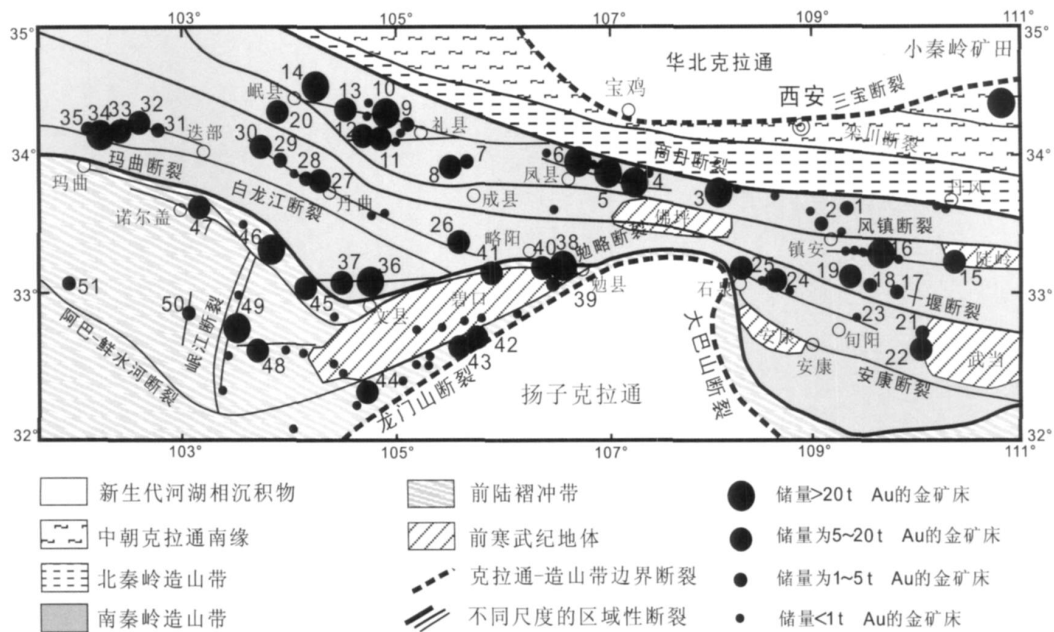
甘肃阳山金矿田位于甘肃省南部文县, 勉略缝合带内(图 1)。阳山金矿是武警黄金部队于 1996 年发现的超大型金矿床, 是我国目前地质勘探储量规模最大的独立金矿床, 至 2006 年底, 发现矿脉 91 条, 探明黄金储量 258 t, 平均品位 5.64 g/t。矿带呈近东西向展布, 长约 60 km, 宽约 3~5 km, 包括

泥山、葛条湾、安坝、高楼山、观音坝(阳山)、张家山、北金山 7 个矿段(图 2)。其中安坝矿段 4 个矿体初步探获 308t 黄金资源量(平均品位 4.05~6.07 g/t)。本文在前人稳定同位素和流体包裹体地球化学以及年代学研究的基础上, 结合矿区构造地质背景和矿物组合, 讨论其成因机制。

收稿日期: 2008-04-28 收到, 2008-06-04 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403508); 国家自然科学基金资助项目(40773021)

作者简介: 赵成海(1982—), 男, 硕士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: chenghai.zhao@gmail.com



据文献[1]修改;矿床编号详见文献[2];36号为阳山金矿
modified from ref. [1]; details of the numbered deposits in ref. [2]; No. 36 is Yangshan gold deposit

图 1 西秦岭构造格架和金矿床分布略图

Fig. 1 Tectonic framework and gold distribution in the west Qinling

1 矿床地质

1.1 地质背景

阳山金矿位于西秦岭造山带的秦岭微陆块、松潘褶皱带(隐伏的阿坝地块)和碧口地体的三联点(图 2),即勉略构造混杂带^[3]北缘。控制阳山金矿产出的主要构造为文县弧形构造,它由一系列近

EW 向断裂及褶皱构成。其中,安昌河-观音坝断裂为含矿构造,由一系列次级断裂及强变形带构成。

区域地层主要有元古宇碧口群、上古生界(泥盆系、石炭系、二叠系)和中生界的三叠系及侏罗系,新生界主要为第四系黄土和陆相冲积物。矿区内三河口群发生了强烈构造变形和不均匀的低级变质,主要由(碳质)千枚岩、板岩、砂岩、碳酸盐岩、硅质岩和

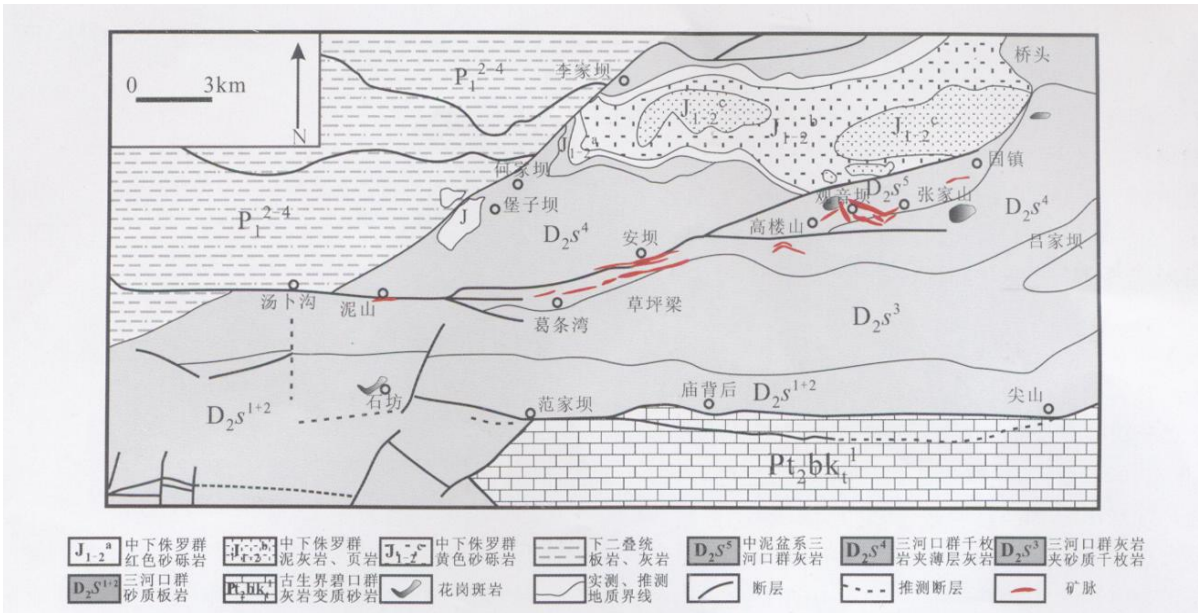


图 2 阳山金矿区地质图

Fig. 2 The geological map of Yangshan gold deposit

绿片岩等组成,部分样品含重晶石等矿物,原岩为浅海相碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩建造,并夹杂热水沉积物和火山凝灰岩。砂质岩、泥质岩、碳质岩和碳酸盐类的金丰度分别为 7.8、3.3、4.5 和 2.6 g/t^[4],显著高于东秦岭不同时代的地层^[5],有利于大型、超大型矿床的形成。

区域岩浆活动与重要构造的时间关系密切,勉略缝合带以北大量发育多期次的花岗岩类^[6,7],特别是晚古生代和中生代的花岗岩类。勉略带以南花岗岩类较少,仅见少量中生代小岩脉和小岩株。阳山金矿田主要发育花岗岩脉和岩株,多为黑云母花岗岩细晶岩、黑云母花岗岩斑岩、黑云母斜长花岗岩斑岩,部分岩脉破碎、蚀变强烈,个别岩脉已强烈蚀变成矿。

矿体赋存于切穿泥盆系三河口群的安昌河-观音坝断裂带内,平面上呈舒缓波状,剖面上为脉状、似层状。矿石主要有蚀变砂岩、蚀变千枚岩、蚀变灰岩和蚀变斑岩等;以黄铁矿化蚀变千枚岩矿石和黄铁矿化蚀变斜长花岗岩斑岩矿石为主。围岩蚀变主要有去碳酸盐化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化、褐铁矿化、高岭土化及碳酸盐化等。矿体与围岩呈过渡关系,矿体边界主要依靠化学分析确定。

根据脉体间的穿切关系、矿石组构和矿物组合及其特征,初步确定阳山金矿热液成矿过程包括早、主和晚 3 个阶段:1) 早阶段主要形成石英-黄铁矿组合;2) 主阶段形成多金属硫化物组合,包括石英-毒砂-黄铁矿等;3) 晚阶段发育碳酸盐-辉锑矿-石英。上述 3 个阶段叠加明显,叠加越多矿化越强烈,金矿化富集作用主要发生在主成矿阶段。

1.2 矿物学特征

矿石中最主要金属矿物为细粒(小于 2 mm)黄铁矿和毒砂,毒砂含量常略高于黄铁矿;其次有自然金、银金矿、毒砂、黄铁矿、辉锑矿、钛铁矿、钒钛磁铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、白铁矿、硫锑铅矿、软锰矿、硬锰矿和褐铁矿等。脉石矿物主要为石英、绢云母、方解石、白云石和长石,次为高岭土、绿泥石、叶蜡石、绿帘石、雄黄、雌黄和重晶石等;微量矿物有锆石、电气石、透辉石、臭葱石和萤石等。金矿物以自然金为主,其次为银金矿^[8,9]。

总体而言,阳山金矿床硫化物含量较低、各类矿物粒度细小。自然金和银金矿主要赋存于毒砂、褐铁矿、辉锑矿和粘土矿物中,有 3 种赋存状态:1) 主要以包裹体形式赋存于毒砂、褐铁矿和粘土矿物中,占 75.46%(镜下统计,下同);(2) 以裂隙金赋存于黄铁矿和褐铁矿的微裂隙中,占 11.82%;(3) 以粒

间金赋存于粘土矿物中,占 12.72%。自然金多以次显微金形式存在于金属矿物中,但 13 号矿脉和安坝矿段 311 号矿脉中发现有明金,粒度达 2~3 mm,明金均产于扁豆状石英(方解石)脉中;此外,在葛条湾矿段矿石光片中发现有少量金矿物,呈他形粒状产于碳酸盐微裂隙中,常与草莓状黄铁矿共生。

2 地球化学特征

2.1 稳定同位素研究

前人^[10~12]对阳山金矿的碳氢氧同位素进行了较系统的研究。其中,斜长花岗岩斑岩的 δC_{PDB} ‰值为-9.14~-2.19,矿化千枚岩中石英脉的 δC_{PDB} ‰值为-8.36,与岩浆成因碳较为接近。氢氧同位素也显示了相同的混合特征,主要投影在变质水和岩浆水附近。少量接近大气降水的样品主要来自远离花岗岩斑岩脉的地层剪切构造带内的石英脉,受地层、地下水或大气降水的影响,代表成矿晚期的流体特征。

与国内其他卡林型金矿床相比,阳山金矿的氢氧同位素与之有一定的共同点,均分布于岩浆水和变质水的共存区域。但阳山金矿的氢氧同位素值域范围更宽,反映流体的多源性(图 3)。

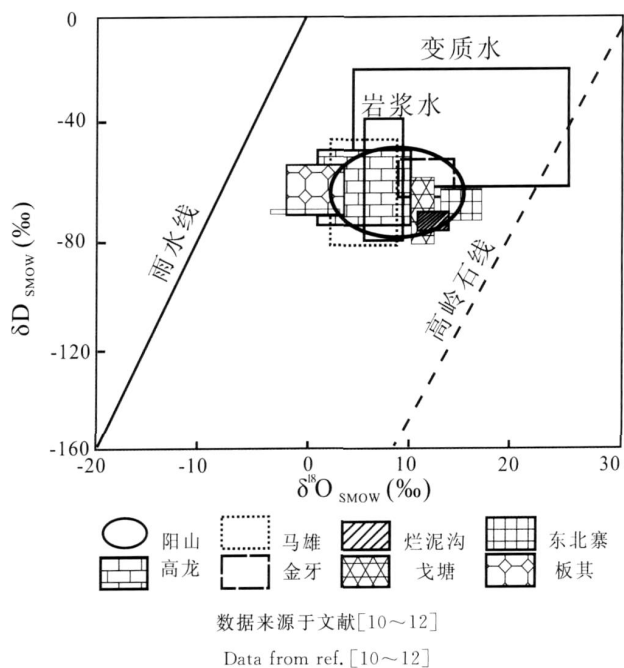


图 3 碳、氢、氧同位素组成

Fig. 3 Isotopic compositions of carbon, hydrogen and oxygen

9 件地层黄铁矿颗粒和其他成因的、具与成矿相关有增生环带含砷黄铁矿的硫同位素分析,获得较离散的硫同位素值(-3.47‰~12.23‰)^[11~13]。

尽管具增生环带的黄铁矿是重要的含金矿物之一，金主要赋存于某个特定的富含砷的增生环带中^[14, 15]，但其内核和外层是不同流体作用的产物^[16]，因而真正与成矿直接相关的有鉴别、标志主要成矿阶段意义的硫化物，仅局限于某个增生环带，并非黄铁矿颗粒整体。早期对阳山矿区黄铁矿的分组中，由于黄铁矿大多是多阶段矿化作用的产物，难以辨别成矿前、成矿峰期、成矿后期形成的黄铁矿信息；这类黄铁矿的硫同位素值域较离散：可以反映成矿流体多阶段的叠加作用，但不能指示单个成矿阶段中成矿流体的硫同位素值。为此，一些研究者分析了不同矿化阶段矿石矿物的硫同位素组成^[17, 18]（图4，序号代表的样品与表1对应），得到表征性的硫同位素组成特征。

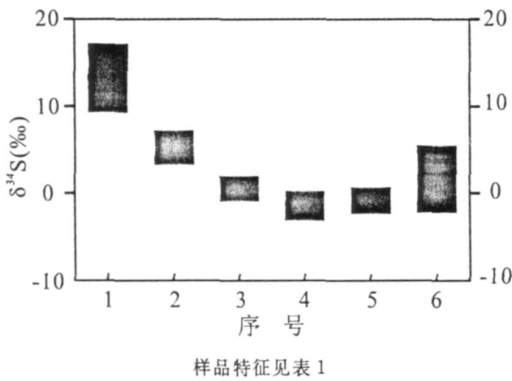


图4 阳山金矿金属硫化物硫同位素特征

Fig. 4 Characteristics of sulfur isotope in metallic sulfides from Yangshan gold deposit

成矿早期蚀变的粉砂岩、粉砂质页岩中的黄铁矿以五角十二面体或比较粗的颗粒为特征， $\delta^{34}\text{S}$ 值为 3.7 ‰~ 6.6 ‰，表明生物硫在构造与热液活动中被显著改造。成矿中期，毒砂和黄铁矿富集于矿化蚀变斑岩。成矿中晚期，毒砂和黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值均显示较小的负值，表明成矿流体中的硫同位素组成以岩浆成因为主。成矿作用的最后阶段，最晚出现的金属硫化物辉锑矿。产于花岗斑岩的石英方解石脉中，此时的成矿流体中，岩浆成因的 S 随着成矿中期金属硫化物的生成而大量消耗，同时受到地层中硫化物的影响， $\delta^{34}\text{S}$ 值表现出较低的负值。

硫同位素有不同来源的现象也说明了成矿作用有明显的阶段性：早期地层中的黄铁矿是成矿流体中 S 的主要来源；中期造山带物质改造脱水和脱水作用^[5] 导致流体沿断裂构造带上升^[20]，上升过程中溶解、混染了韧性转换带和构造破碎带中的硫化物，并有部分岩浆水参与了成矿作用；成矿晚期大气降水不断混入成矿流体。不同成矿阶段的流体作用，在对硫同位素值的分析中得到了区分。

2.2 流体包裹体研究

矿区不同成矿阶段的石英和方解石流体包裹体研究显示^[12, 21, 22]，阳山金矿的成矿流体 CO_2 含量高，盐度低。从成矿早阶段到晚阶段，均一温度逐渐降低（表2）。成矿流体中含有较高的 CO_2 ，这与造山型金矿流体一致，说明成矿深度较大，在较高的压力下 CO_2 溶解于来自变质脱水作用提供的流体。主成矿阶段，成矿流体进入断裂带，进入降温、减压

表1 阳山金矿金属硫化物硫同位素组成

Table 1 Isotopic compositions of sulfur in metallic sulfides from Yangshan gold deposit

序号	样品类型	赋存岩性	样品数量	形成序次	$\delta^{34}\text{S}$ 值范围(‰)
1	沉积成因黄铁矿	千枚岩、灰岩	5	沉积成岩	9.6 ~ 17.5
2	粗粒黄铁矿	蚀变粉砂岩、页岩	4	成矿早期	3.7 ~ 6.6
3	黄铁矿	矿化蚀变斑岩	5	成矿中期	- 1.5 ~ - 2.1
4	毒砂	矿化蚀变斑岩	5	成矿中期	- 3.2 ~ - 0.2
5	黄铁矿	石英脉	5	成矿中 - 晚期	- 2.2 ~ - 0.7
6	辉锑矿	石英方解石脉	4	成矿晚期	- 4.7 ~ - 2.1

注：数据来源于文献[9, 17, 19]

状态。这时流体包裹体类型多样，均一温度相似，流体盐度峰值处于 < 2 ‰和 3.5 ‰~ 5.5 ‰，具双峰特征。以上特征说明流体沸腾作用强烈^[22]。受沸腾作用的影响，成矿流体中 CO_2 等气体成分大量逸散，流体盐度增高；物理化学条件的变化启动了成矿作用：含砷黄铁矿、毒砂、自然金等快速沉淀，发生强烈的矿化作用。

表2 流体包裹体均一温度和盐度

Table 2 Homogenization temperature and salinity of fluid inclusions

早阶段均一温度()	主阶段均一温度和盐度(NaCl) / %	晚阶段均一温度()
	220 ~ 270; 3.5 ~ 5.5	140 ~ 180
260 ~ 310	220 ~ 240; 1.6 ~ 6.5	150 ~ 190
270 ~ 300	210 ~ 270; < 2 和 3.5 ~ 5	160 ~ 210

注：数据来源于文献[12, 21, 22]

2.3 同位素年代学研究

阳山金矿经历了多期次的构造、岩浆和热液作用,矿体、围岩、侵入岩广泛遭受硅化、黄铁矿化和绢云母化。因此在选择年代学研究的样品和测试方法时要特别注意。

锆石的 SHRIMP U-Pb 定年和独居石 U-Thr Pb 定年^[23]获得成岩年龄为 220 ~ 200 Ma。含金石英-黄铁矿细脉中的石英获得 195.3 ± 0.9 Ma (³⁹Ar-⁴⁰Ar 坪年龄)和 190.7 ± 2.4 Ma (等时线年龄^[19])的成矿年龄。黄铁矿包裹的独居石电子探针 U-Thr Pb 年龄测定,获得 190 ± 3 Ma 的成矿年龄^[9](表 3)。

表 3 阳山金矿成岩、成矿阶段同位素年代学数据对比
Table 3 Comparison of the ages of rock and deposit formation in Yangshan gold deposit

样品 类型	年龄 含义	获得数 据/ Ma	样品/ 点数量	测试 方法
斑岩中石英细脉	成岩	197.6 ± 1.7	3	锆石 SHRIMP U-Pb
斑岩中独居石	成岩	220 ± 3	12	独居石 Th-U-Pb
含金石英脉	成矿	195.3 ± 0.9	10	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar
斑岩中黄铁矿包裹的独居石	成矿	190 ± 3	7	独居石 Th-U-Pb

注:数据来源于文献[9, 19, 23]

3 矿床成因讨论

阳山金矿与典型的卡林型金矿床相比,有一定的相似性:1)矿化元素、矿石矿物组合。阳山金矿和卡林型矿床中均有 Au-As-Sb-Hg 矿化元素组合和黄铁矿、毒砂的矿物组合;2)赋矿地质体。沉积岩是卡林型金矿床最主要的赋存地质体,有西秦岭卡林类卡林型金矿省中泥盆系和三叠系是最主要的赋矿地层^[24],阳山金矿的围岩也是泥盆系三河口群地层;3)含金的硫化物多在若干阶段矿化作用的叠加作用下形成。

但两者也有一定的差异:1)构造背景:阳山金矿位于典型的碰撞造山带,其构造背景显著不同于活动大陆边缘的弧后盆岭省的美国卡林型金矿床^[2, 14, 25, 26];2)矿石类型:阳山金矿的矿石主要为蚀变千枚岩和蚀变花岗斑岩;而卡林型金矿的矿石以蚀变沉积岩特别是蚀变钙质粉砂岩为主;3)阳山金矿中不同阶段不同来源的流体受到广泛分布的硅质岩的屏蔽,也受控于不同规模的断裂构造,受花岗斑岩脉侵入时形成的构造薄弱带的影响,因此不同流体成矿作用既有重合叠加又有差异分布。

阳山金矿与造山带型矿床特征的异同:1)矿体

特征:阳山金矿的矿体呈脉状,边界模糊;而造山型矿床的矿体呈脉状,边界清晰;2)流体包裹体^[22]:阳山金矿的流体成矿过程是一个减压、降温、CO₂含量降低的过程,该特征与典型的造山型金矿一致。因此,我们将阳山金矿称为“阳山型矿床”。

3.1 流体与成矿作用的联系

成岩、成矿年龄对比表明,阳山矿区的成矿作用稍微滞后于成岩作用,大规模的流体成矿作用在花岗斑岩岩脉侵入之后,成矿流体沿花岗斑岩岩脉侵入的构造破碎带运移、沉淀、成矿。在这一过程中,花岗斑岩岩脉及其定位的构造破碎带是容矿空间;这一特征有别于造山型金矿和卡林型金矿床。研究表明^[3, 6, 7],扬子板块与华北板块沿勉略缝合带的碰撞始于 220 ~ 200 Ma。阳山矿区与勉略缝合带相邻,花岗斑岩的成岩年龄也集中于 220 ~ 200 Ma,表明花岗岩体是同碰撞的产物。

陆陆碰撞期,发生了强烈的地壳变形改造、花岗岩类岩浆活动和大规模变质流体作用^[7, 27]。这一过程在阳山矿区表现为广泛的区域变质作用、斜长花岗斑岩岩脉的侵入。强烈的陆陆碰撞体制的花岗岩岩浆活动形成更大规模的岩浆隐伏体,航磁资料和大 地电磁测量等地球物理方法已初步确认在葛条湾矿段有大规模的岩浆隐伏体^[17]。野外观测和勘探工程证实,阳山金矿的矿体普遍见于岩浆岩与破碎千枚岩(原岩为泥盆系三河口群薄层状粉砂质、泥质岩层)的接触带。这一规律若能在矿区下伏岩浆隐伏体中仍然适用,则金矿的储量与规模将显示极大潜力,这一推测需要进一步工作来验证。

3.2 用 Fe-As-S 系统分析成矿作用

毒砂是阳山金矿最主要的赋金矿物,也是卡林型金矿的主要矿化阶段的标志。但毒砂在 Fe-As-S 系统中的位置尚未得到实验证实^[28]。根据物理化学及矿物学规律,毒砂在 Fe-As-S 系统中的位置应当部分或全部与自然砷和黄铁矿的相区一致,当然毒砂在该相区的部分区域应该已经分解,转化为其他硫化物、砷化合物。阳山金矿中难以见到自然砷,这说明阳山矿区大部分自然砷已与黄铁矿反应,生成了毒砂。毒砂状态是否稳定(亚稳定)尚不得而知,但在 Fe-As-S 系统中,高于 300 °C 时,自然砷及砷化合物的相区已经消失,表明毒砂难以形成于高于 300 °C 的环境。与该特征一致的是,阳山金矿流体包裹体测温(210 ~ 270 °C)^[22]的结果可资佐证。

如图 5 所示,随着成矿温度的降低,如果流体中的 f_{S₂} 恒定或者递增变化,即物相的演变趋势线是水平或向上的(过程 A),将会形成毒砂-黄铁矿-雄

黄-雌黄的矿物共生序列。然而阳山矿区并不常见雌黄。因此,可行的路径将是 f_{S_2} 也随着温度下降而降低。

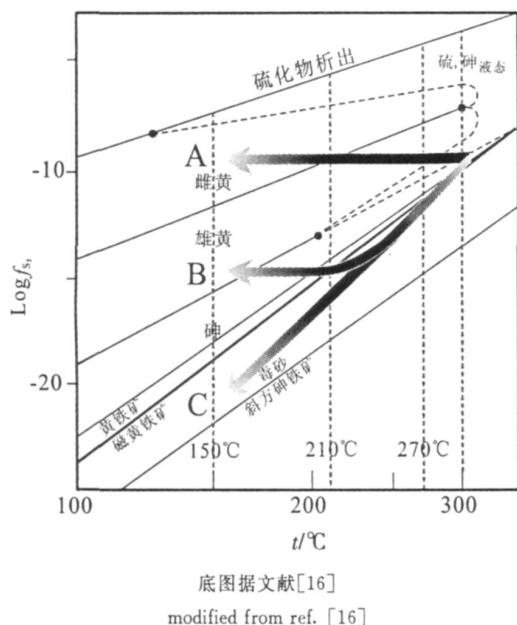


图5 Fe-As-S系统的温度-硫逸度对数关系图

Fig. 5 $\log f_{S_2}$ - T diagram of Fe-As-S system

阳山金矿中成矿流体在受到温度更低的岩石、断裂带的缓冲后,都会随温度的下降经历黄铁矿、毒砂与雄黄相区的临界状态,最直接的表现是黄铁矿-毒砂组合几乎随处可见。随着毒砂、黄铁矿的形成,流体的沸腾作用^[22]也在加快 H_2S 的逸散。流体中的 S 不断以 H_2S 逸散和硫化物的析出而减少,因此难以保证 f_{S_2} 的持续增长,导致矿物序列从雄黄向黄铁矿、毒砂方向发展(图5,过程B、C)。

阳山矿区常见黄铁矿-毒砂的共生序列,也可见黄铁矿-毒砂-雄黄的共生序列。前者与阳山金矿所处的构造特征相符。在勉略造山带,构造伸展阶段的构造附加压力消失,甚至向拉张力转变,地温梯度降低。流体包裹体研究表明^[22],阳山金矿的成矿过程是一个成矿流体减压、降温并出现沸腾现象的过程;同时地壳深部的活动组分因早中阶段变质脱水、脱气和熔融而枯竭或亏损相应的变质脱挥发作用,使流体中的水溶 H_2S 大量逸散,导致缺乏足够的物源或载体来补充 S。

根据实际观察到的矿物共生序列,结合 Fe-As-S 系统及流体包裹体研究获得的成矿温度信息,可以将阳山金矿的成矿过程大致归纳如下(图5,过程B)。

(1) 成矿早期阶段:成矿流体的均一温度为 270 ~ 300 ,已经具备了生成毒砂的理论温度条

件,但其的矿物组合仅有石英-黄铁矿,并未见毒砂。这时成矿流体处于相对稳定状态,流体中 S 的补充和损耗相对平衡或者变化缓慢。成矿流体中 S 的初始含量相对较低,很快进入黄铁矿结晶析出的状态。

(2) 经过短暂的降温过程后,成矿流体在温度降至 270 时进入了主成矿阶段。这时伴随黄铁矿、毒砂的大量生成,成矿流体中的 S 被快速消耗。同碰撞造山作用诱发的大规模变质流体提供了充足的成矿流体。刚刚侵入脆韧性剪切带的花岗斑岩岩脉被随后的区域构造运动剪切成扁豆状、雁列状,使成矿流体的运移通道被进一步疏通。大量变质流体在岩浆热驱动下,沿花岗斑岩与破碎千枚岩的接触带上涌,萃取地层中已相对富集的 Au,并以络合物的形式搬运。与此同时,碰撞体制下的大规模岩浆活动也将岩浆水补充到成矿流体中,并带来部分成矿物质,多来源流体的混合导致成矿流体的物理化学条件发生变化,促进了成矿作用的进行。随着温度的降低,黄铁矿和毒砂不断结晶和沉淀,而 Au 以自然金的形式被黄铁矿和毒砂包裹于增生环带中,在花岗斑岩与破碎千枚岩的接触带成矿。

在主成矿阶段,温度与 S 逸度的关系并不会像“过程 C”那样, S 逸度随温度简单下降。这是因为考虑到作为主导作用的变质流体,受到了区内深伏岩体提供的岩浆水的补充,流体中的硫获得补充后,硫逸度趋于稳定,硫化物的生成沿图5所示的过程 B 发展。因此该阶段生成的金属硫化物的硫同位素值以具较小的负值为特征,并呈现下降趋势。此外,“过程 C”不能在中期和晚期形成雄黄,这与矿区矿物组成不符。

(3) 当成矿流体降温至 210 时,成矿作用进入晚期阶段,这时成矿流体中的 S 以金属硫化物的形式脱离流体。淋滤了地层硫的大气水,逐渐补充到晚期阶段的成矿流体中,使矿物具有明显的大气水特征。获得了 S 的补充后,成矿流体的 S 逸度趋于稳定,此时流体中的金属阳离子已经消耗殆尽,生成的硫化物向雄黄的方向发展。最终,成矿流体在生成辉锑矿-碳酸盐-石英等晚期矿物后,结束了整个矿化过程。

4 结 论

上述诸多证据表明,在主要成矿阶段变质流体发挥了重要作用。区内的花岗斑岩的成岩年龄与勉略缝合带内的大量同碰撞花岗岩的成岩时代相近。碰撞造山过程诱发了大规模的花岗岩岩浆活动。大

量变质流体在岩浆岩提供的驱动热作用下,沿花岗岩斑岩与破碎千枚岩的接触带上涌,萃取出地层中已经相对富集的 Au,并以络合物的形式搬运。在成矿中期和后期,分别有岩浆水和大气水补充进入成矿流体。因此,阳山金矿床是在西秦岭陆陆碰撞造山的背景下,在与碰撞型花岗质岩浆活动同步的大规模变质流体作用下,形成的超大型金矿床。阳山超大型金矿兼有卡林型金矿和造山型金矿的特征,又有与两者明显区别的地质和地球化学特征,规模巨大并在西秦岭地区的金矿床中具有重要的代表性、重大的经济价值和科研价值。

致谢 本文在撰写过程中得到中国科学院地球化学研究所许成研究员的耐心指导和帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

- [1] Zhang J, Chen YJ, Zhang FX. Ore fluid geochemistry of the Jinlongshan Carlin-type gold deposit ore belt in Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2006, 25: 23 - 32.
- [2] 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 2004, 50: 134 - 152.
Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, Pirajno F, Li Chao. Carlin and Carlin-like Gold Deposits in Western Qinling Mountains and Their Metallogenic Time, Tectonic Setting and Model[J]. Geological Review, 2004, 50: 134 - 152. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui, Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 855. (in Chinese)
- [4] 王学明, 邵世才, 汪东波. 甘肃文康地区金矿地质特征与找矿标志[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8: 220 - 226.
Wang Xueming, Shao Shicai, Wang Dongbo. Geological features and exploration symbol of Gansu Wenkang region[J]. Nonferrous Mineral Resources and Exploration, 1999, 8: 220 - 226, (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 234.
Chen Yanjing, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan China [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 234. (in Chinese)
- [6] Sun WD, Li SG, Chen YD, Li YJ. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Journal of Geology, 2002, 110: 457 - 468.
- [7] Zhang Jing, Chen Yanjing, Shu Guiming, Zhang Fuxin, Li Chao. Compositional study of minerals within the Qinlingiang granite, Southwestern Shaanxi and discussions on the related problems[J]. Science in China (D), 2002, 45: 662 - 672.
- [8] 郭俊华, 齐金忠, 孙彬, 余金元, 袁士松. 甘肃阳山特大型金矿床地质特征及成因[J]. 黄金地质, 2002, 8: 15 - 19.
Guo Junhua, Qi Jinzhong, Sun Bin, Yu Jinyuan, Yuan Shisong. Geological features and origin of Yangshan super large gold deposit, Gansu[J]. Gold Geology, 2002, 8(2): 15 - 19. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义[J]. 岩石学报, 2006, 22: 2603 - 2610.
Yang Rongsheng, Chen Yanjing, Zhang Fuxin, Li Zhihong, Mao Shidong, Liu Hongjie, Zhao Chenghai. The chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu province and their geologic and metallogenic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (10): 2603 - 2610. (in Chinese with English abstract)
- [10] 罗锡明, 齐金忠, 袁士松, 李志宏. 甘肃阳山金矿床微量元素及稳定同位素的地球化学研究[J]. 现代地质, 2004, 18: 203 - 209.
Luo Ximing, Qi Jinzhong, Yuan Shisong, Li Zhihong. Geological and microelement geochemical study of Yangshan gold deposit, Gansu province[J]. Geoscience, 2004, 18(2): 203 - 209. (in Chinese with English abstract)
- [11] 齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. 矿床地质, 2005, 24: 141 - 150.
Qi Jinzhong, Li Li, Yuan Shisong, Liu Zhijie, Liu Dunyi, Wang Yanbin, Li Zhihong. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu province[J]. Mineral Deposits, 2005, 24: 141 - 150. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李志宏, 杨印, 彭省临, 袁茂森. 甘肃阳山超大型热液金矿床的成因特征[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31: 63 - 76.
Li Zhihong, Yang Yin, Peng Shenglin, Yuan Maosheng. Metallogenic features of the Yangshan super large hydrothermal gold deposit in Gansu[J]. Geotectonic et Metallogenia, 2007, 31: 63 - 76. (in Chinese with English abstract)
- [13] 袁士松. 甘肃省文县阳山特大型金矿床成矿作用研究[J]. 矿产与地质, 2007, 21: 404 - 409.
Yang Shisong. Research on metallogenic process of the Yangshan super large gold deposit, Wen County, Gansu Province [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21: 404 - 409. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张复新, 马建秦, 陈衍景. 秦岭卡林型金矿床金、砷地球化学探讨[J]. 地球化学, 1999, 28: 453 - 463.
Zhang Fuxin, Ma Jianqin, Chen Yanjing. The study on geochemistry of gold and arsenic mineralization in Carlin type gold deposits, Qinling region[J]. Geochimica, 1999, 28 (5): 453 - 463. (in Chinese with English abstract)
- [15] 马建秦, 李朝阳, 张复新. 秦岭煎茶岭金矿床含金富砷黄铁矿增生环带研究[J]. 矿物学报, 1999, 19: 139 - 147.

- Ma Jianqin, Li Chaoyang, Zhang Fuxin. Research on gold bearing hyperplasia clutellum of Arsenic pyrite in Jianchaling gold deposit Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19: 139 - 147.
- [16] Kesler S E, Riciputi L C, Ye Z J. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: Isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer Deposit, Nevada, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40: 127 - 136.
- [17] 张复新, 侯俊富, 张存旺, 李晶, 杨荣生. 甘肃阳山超大型卡林-类卡林型复合式金矿床特征[J]. *中国地质*, 2007, 34: 1062 - 1071.
- Zhang Fuxin, Hou Junfu, Zhang Cunwang, Li Jing, Yang Rongsheng. Characteristics of the superlarge Yangshan Carlin and Carlin-like compound type gold deposit in Gansu[J]. *Geology in China*, 2007, 34: 1062 - 1071. (in Chinese with English abstract)
- [18] 雷时斌, 齐金忠. 甘肃阳山金矿带地球动力学体制与多因耦合成矿作用[J]. *地质与勘探*, 2007, 43: 33 - 39.
- Lei Shibin, Qi Jinzhong. Geodynamics system and multi-factor coupling mineralization in the Yangshan gold belt Gansu [J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43: 33 - 39. (in Chinese with English abstract)
- [19] 齐金忠, 袁士松, 李莉, 孙彬, 郭俊华, 李志宏, 范永香, 刘伟, 高秋斌. 甘肃省文县阳山金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *地质论评*, 2003, 49: 85 - 92.
- Qi Jinzhong, Yuan Shisong, Li Li, Sun Bing, Guo Junhua, Li Zhihong, Fan Yongxiang, Liu Wei, Gao Qiubing. Geological features and ore controlling factors of Yangshan superlarge gold deposit [J]. *Geological Review*, 2003, 49: 85 - 92. (in Chinese with English abstract)
- [20] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 7 - 27.
- [21] 刘伟, 范永香, 齐金忠. 甘肃文县阳山金矿床流体包裹体的地球化学特征[J]. *现代地质*, 2003, 17: 444 - 452.
- Liu Wei, Fan Yongxiang, Qi Jinzhong. Geochemistry characteristics of fluid inclusion of Yangshan gold deposit in Wenshan, Gansu Province, China [J]. *Geoscience*, 2003, 17: 444 - 452. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[J]. *岩石学报*, 2007, 23: 2144 - 2154.
- Li Jing, Chen Yanjing, Li Qiangzhi, Lai Yong, Yang Rongsheng, Mao Shidong. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (9): 2144 - 2154. (in Chinese with English abstract)
- [23] 齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. *矿床地质*, 2005, 24: 141 - 150.
- Qi Jinzhong, Li Li, Yuan Shisong, Liu Zhijie, Liu Dunyi, Wang Yanbin, Li Zhihong. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu Province [J]. *Mineral Deposit*, 2005, 24: 141 - 150. (in Chinese with English abstract)
- [24] Kerrich R, Goldfarb R, Groves D. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. *Science in China (D)*, 2000, 43 (sup.): 1 - 68.
- [25] Zhang F X, Chen Y J, Li C. Geological and geochemical character and genesis of the Jinlongshan-Qiuling gold deposits in Qinling orogen: Metallogenic mechanism of the Qinling-pattern Carlin-type gold deposits [J]. *Science in China (D)*, 2000, 43 (Sup.): 95 - 107.
- [26] 张静, 陈衍景, 张复新, 李超. 陕西金龙山卡林型金矿带成矿流体地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2002, 21: 283 - 291.
- Zhang Jing, Chen Yanjing, Zhang Fuxin, Li Chao. Geochemical study of ore fluid in Jinlongshan Carlin-type gold deposit belt in southwestem Shaanxi Province [J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21: 283 - 291. (in Chinese with English abstract)
- [27] Chen Y J, Chen H Y, Zaw K. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview [J]. *Ore Geology Review*, 2006 2005. 01. 001
- [28] Clark L A. The Fe-As-S system: Phase relations and applications [J]. *Economic Geology*, 1960, 55: 1345 - 1381.